

大庙铁矿田——危机矿山还是潜在超大型铁矿基地

孙 静¹ 罗照华² 张长厚² 郭少丰^{2,3} 李 健¹
杜维河¹ 王德忠¹ 潘 颖² 周久龙² 李旭东²

(1. 河北省地勘局第四地质大队, 河北 承德 067000; 2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 河北省地勘局第二地质大队, 河北 唐山 063000)

摘要:笔者主要基于野外观察认为大庙铁矿田具有巨大的找矿勘探远景,有可能成为中国最大的铁矿资源基地。新的证据不支持大庙斜长岩杂岩体的各组成单元为同源岩浆演化产物的认识,也不支持大庙式铁矿的矿浆成因说。斜长岩至少比苏长岩多经历了两次构造变形,表明后者是在斜长岩冷却固结之后侵位的。大庙式铁矿的形成与苏长质岩浆密切相关,但含矿物质不是来自于苏长质岩浆的分异作用,而是同时侵位的透岩浆流体。含矿岩浆-流体混合物在地壳深部的排气作用导致了成矿物质在苏长岩中的富集,也导致了浅部脉状矿体上磷下铁的特点,主要矿体隐藏在斜长岩之下的苏长岩中。因此,大庙铁矿田仍具有巨大的找矿潜力。

关键词:大庙;铁矿;透岩浆流体;成矿作用;构造变形;斜长岩;苏长岩

中图分类号:P618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)02-0255-13

承德,大庙,一个是享誉中外的旅游名城,一个是中国岩体型斜长岩-钒钛磁铁矿产地的唯一。如今,名城依然游人如织,铁矿却似乎风光不再,被深深打上了危机矿山的标记。然而,大庙地区到底是铁矿资源即将枯竭还是具有潜在的发展潜力,根据以往的资料是难以作出判断的,其根本原因是大庙式铁矿的形成机制认识不清。同时,铁矿资源也被列为中国的紧缺资源,其资源储备关系到国民经济的可持续发展。因此,阐明大庙式铁矿的成因及其进一步勘探开发的潜力,不仅直接关系到大庙式铁矿的命运,也可以为有关部门作出战略决策提供科学依据。

20 世纪 60—70 年代,大庙铁矿田及其寄主岩斜长岩杂岩体曾经是中国矿床学家和岩石学家重点关注的研究对象之一。基于这些研究,大庙斜长岩杂岩体被认为是一个由多个岩性单元组成的杂岩体,有关的铁矿床为晚期矿浆贯入型矿床。这一认识似

乎被广泛接受,因而近年来很少有人再涉足大庙斜长岩杂岩体和大庙铁矿的研究。因此,有关大庙斜长岩杂岩体及其相关成矿作用的新资料非常少。叶东虎^[1]的研究报告距今已有二十多年,却是迄今为止最为详尽的、有关大庙斜长岩及其成矿作用的新资料,但由于没有公开出版而不为人知。解广轰^[2]对大庙斜长岩的研究进行了总结,认为大庙斜长岩杂岩体是“在深部岩浆房内结晶分异后,携有高压巨晶的粥状熔体侵位到上地壳进一步结晶分异而成”。但没有提供可以改变大庙式铁矿成因模型的新证据。令人惊奇的是,笔者没有查阅到可靠的矿田构造和火成岩与成矿作用关系方面的研究成果。例如,尽管叶东虎指出成岩成矿作用为液态分异、熔离和结晶分异综合作用的结果^[1],却没有提供这些过程必然导致与矿体特征相匹配的证据。李国兴等^[3]对于区域控矿断裂构造作了较详细的阐述,也没有阐明这些断裂构造与成矿作用的必然联系。因此,大庙铁矿田的控

收稿日期:2008-11-16;改回日期:2008-12-22

基金项目:有色金属矿产地质调查中心危机矿山勘查理论项目(200699105-4)、河南省地质矿产重大科技攻关计划项目(26417)、天津华北地质勘查总院科研项目(KY2008-2)及国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B08)资助。

作者简介:孙静,男,1970年生,高级工程师,核技术专业,固体矿产资源勘查方向;E-mail:dzgsj@126.com。

通讯作者:罗照华,男,1956年生,教授,博士生导师,矿物岩石矿床学专业,岩浆活动与成矿作用方向;E-mail:luozh@cugb.edu.cn。

矿因素至今仍然模糊不清。

本文的目的是基于初步的野外地质观察结果,阐述大庙式铁矿的基本地质特征。在此基础上,提出大庙式铁矿的形成主要与透岩浆流体成矿作用有关,并认为大庙铁矿田有可能成为中国最大的铁矿资源基地。

1 大庙斜长岩杂岩体的地质特征

斜长岩(anorthosite)是最令人琢磨不透的岩石之一,其成因至今仍然是有疑问的[4]。这种情况不仅影响了岩石成因理论的完善,也影响了相关矿产的开发利用。一般认为,斜长岩基本上是一类单矿物深成岩,几乎完全由斜长石组成。斜长石通常为拉长石,但也可以有倍长石这样富钙或中长石-更长石这样富钠的斜长石,暗色矿物很少或者没有。由于斜长岩中斜长石占绝对优势,远远超出镁铁质岩浆的共结比,绝大多数学者认为斜长岩形成于玄武质岩浆的斜长石堆晶作用,并因此将其与共生的辉长岩、

纹长二长岩、花岗岩类归并为一个岩石组合(AGMC)。目前,多数学者认为这些岩石类型的产生是幔源岩浆分异的结果。但是,Longhi[4]对所有可能的原生岩浆和同化混染过程进行分离结晶(FC)和同化混染+分离结晶(AFC)计算之后认为,没有一种原生岩浆适合于作为岩体型斜长岩的母岩浆。可见,岩体型斜长岩的成因问题至今仍是一个谜,或者说杂岩体的每一个岩石单元未必都是同一液体血统线上的成员。

大庙斜长岩杂岩体位于华北克拉通北缘,沿着红石砬-大庙-娘娘庙断层北侧分布(图1),是中国唯一的一个岩体型斜长岩杂岩体[2-3]。根据叶东虎的意见,本区斜长岩体可以划分为头沟变质斜长岩体、大庙斜长岩体和岗子苏长-斜长岩体[5]。这些斜长岩体均被认为与铁成矿作用有关,加之周边地区产出的BIF型铁矿和与基性-超基性岩有关的铁矿,大庙地区的铁矿资源应当是非常丰富的。本文主要以黑山铁矿为例,试图阐明大庙斜长岩体与成矿作用的关系。

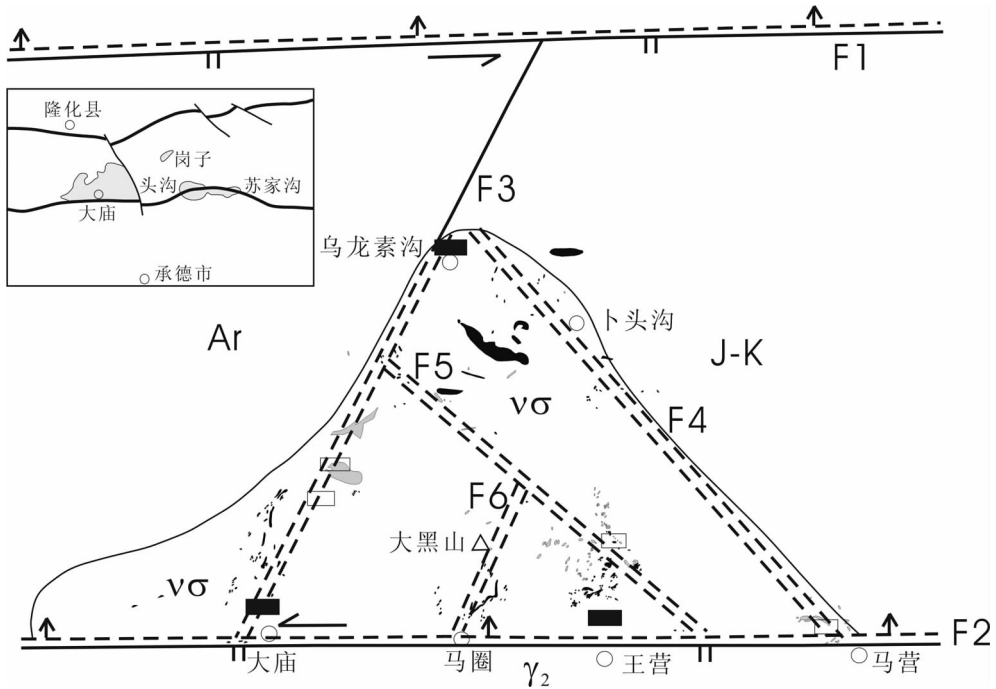


图1 大庙杂岩体矿产地质示意图(据文献[3]修改)

Ar—太古宇;J-K—侏罗系-白垩系;γ₂—元古宙花岗岩类;vσ—斜长岩;
F1—断层及其编号;空方框—磷矿床;黑方框—铁矿床;其他黑区域—地表出露的矿体

Fig.1 Geological sketch map of the Damiao anorthosite complex, showing the distribution of ore bodies (modified from [3])

Ar - Archean;J-K -Jurassic-Cretaceous;γ₂ - Proterozoic granitoids;vσ - Anorthosite;
F1 -Fault and its serial number;hollow framework- apatite-dominated deposit; filled framework- magnetite-dominated deposit; other filled areas - ore bodies cropped at the surface

许多学者认为大庙斜长岩体是由具有成因联系的各种岩石组成^[2],部分学者提出苏长岩的形成明显晚于斜长岩^[1,3],分别形成于 1000~1200 Ma 和 1700 Ma 左右。然而,新的单颗粒锆石 U-Pb 法测年结果为:苏长岩(1693±7) Ma,纹长二长岩(1715±6) Ma^[6]。由此,赵太平等认为“大庙斜长岩杂岩体的侵位至少持续了约 20 Ma”。加之大庙斜长岩的锆石 SHRIMP 测年结果为(1726±9) Ma^[6],这一时间跨度增大到 33 Ma。即使这样,大庙斜长岩杂岩体依然被认为与密云奥长环斑花岗岩、长城系大红峪组钾质火山岩,以及广泛发育的基性岩墙群一起代表华北陆块 1750~1650 Ma 大陆裂解事件的岩浆作用产物^[2,5,6]。这样的认识可能是有问题的。一方面,世界典型斜长岩杂岩体的形成时间要短得多,例如,乌克兰地盾的

Korosten 岩体为~6 Ma^[7]。另一方面,斜长岩侵入体接触变质晕的矿物组合记录了其形成压力介于 0.3~0.6 GPa^[8,9],相当于 10~20 km。在这个压力区间,大陆边缘弧的峰期变质温度为 475~720 °C^[10];如果按裂谷区>40°C/km 地热梯度^[11]换算,其围岩温度相当于>400~800°C。大庙斜长岩的围岩温度可能更高,因为岩体与围岩之间无冷凝边和明显的接触变质现象^[2]。在这样的高温条件下,测试样品是否能够记录岩石的形成年龄可能是有疑问的。也就是说,大庙斜长岩杂岩体的测年结果可能主要代表同位素时钟的封闭年龄,而不是火成岩的形成年龄。此外,在这样的温度条件下,太古宙 TTG 岩系应当发生较大规模的部分熔融产生花岗质岩浆。但是,本区的花岗岩最新单颗粒锆石 U-Pb 测年结果为(1730±16) Ma^[5],

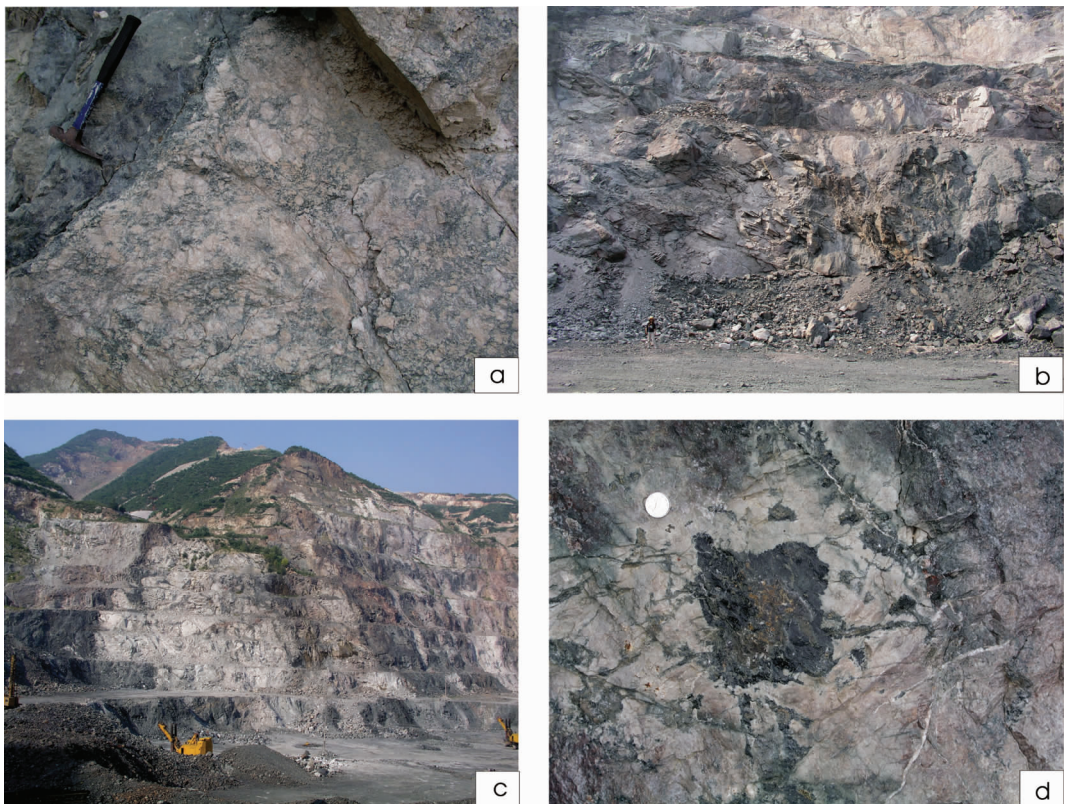


图 2 斜长岩与矿化苏长岩的接触关系

a—矿化苏长岩侵入斜长岩并导致斜长岩发生强烈蚀变(绿泥石化),地质锤长度为 35cm;b—不规则斜长岩块体沉入在矿化苏长岩中并被后者所“胶结”;c—矿化苏长岩呈脉状侵入斜长岩中,从上到下,岩(矿)脉数量越来越多,形态越来越不规则;d—含矿岩浆-流体流渗透侵入到斜长岩中,使后者强烈蚀变并矿化,硬币直径为 1.9 cm

Fig.2 Contact relationship between anorthosite and mineralized norite

a—Mineralized norite intruding anorthosite and causing strong alteration (chloritization) of the latter (the length of the hammer being 35cm); b—Irregular anorthosite fragments sunk in norite and cemented by norite; c—Mineralized veinlet norite intruding anorthosite with number and shape of veinlets varying downward; d—Ore-bearing melt-fluids percolating in anorthosite and causing alteration and mineralization of the latter (diameter of the coin being 1.9 cm)

大于杂岩体中任何一种岩石的锆石测年结果。因此,要么花岗岩是幔源岩浆侵位过程中地壳熔融的产物,其年龄应当与大庙斜长岩相近;要么与大庙斜长岩杂岩体不是同一次构造-岩浆活动的产物。在缺少确切的地质证据之前,尚不能肯定这些花岗岩是否与斜长岩杂岩体有成因联系。

实际上,即使空间上紧密联系在一起斜长岩和苏长岩,也未必有成因联系。例如,在黑山铁矿露天采场,可以清楚观察到含矿苏长岩侵入于斜长岩中(图 2)。一方面,含矿苏长岩的侵位导致斜长岩强烈蚀变(图 2-a);另一方面,斜长岩呈脆性块体“落入”苏长岩中(图 2-b),这两方面的证据表明含矿苏长岩侵位之前斜长岩已经固结冷却,因而有关二者之间具有成因联系的认识可能是有问题的。

总体上,斜长岩位于苏长岩之上,推测二者的接触界面向北缓倾斜^[1],大乌素沟的钻探资料充分证实了这一点。正因为如此,斜长岩的出露面积远大于其他岩类^[3]。但是,也常见苏长岩和矿体高角度侵入于斜长岩中(图 2-c)以及蚀变产物呈孤岛状出现在斜长岩中(图 2-d)。据此,苏长岩形成时间应当晚于斜长岩,因而建立在岩性渐变过渡基础上的分异机制^[2]可能是不正确的。

综上所述,野外观察证据支持苏长岩晚于斜长岩的观点^[1,3],大庙斜长岩体总体上是一个层状杂岩体。但是,苏长岩普遍呈孤岛状出现在斜长岩分布区,也表明苏长岩与斜长岩是侵入接触关系,二者的界面是起伏不平的。然而,迄今为止尚不清楚苏长岩层的厚度,因而无法用质量平衡原理来验证岩浆分异作用导致成矿的可能性。

2 代表性岩石与矿石的宏观特征

大庙斜长岩杂岩体主要由斜长岩、苏长岩、纹长二长岩和石英纹长二长岩组成^[2],其中与成矿作用有关的主要是苏长岩和斜长岩^[1,3]。本文主要涉及与成矿有关的斜长岩与苏长岩,且以黑山铁矿露天采场为例。

2.1 斜长岩

斜长岩是大庙杂岩体浅部的主要组成单元,也是大庙式铁矿最早被识别的赋矿岩石。斜长岩主要出露于大庙斜长岩体中,因而大庙岩体被认为是本区蕴藏矿产最丰富的岩体^[1]。

斜长岩按颜色可划分为暗色斜长岩和浅色斜长

岩两个变种^[1],黑山露天采场一带出露的主要为浅色斜长岩。野外露头观察,浅色斜长岩几乎全部由斜长石组成,岩性变化主要表现为颜色和变形特征的变化。斜长岩主要为碎斑结构(图 3-a),基质为碎裂结构或等粒变晶结构(图 3-b)。最大的斜长石碎斑粒径可达 35 cm^[1],一般为 3~5 cm。根据前人的研究,浅色斜长岩是暗色斜长岩蚀变的结果。根据蚀变矿物组合特征,可以划分出钠黝帘石化斜长岩、硅化钠黝帘石化斜长岩、绿泥石钠黝帘石化斜长岩、纤闪石绿泥石化斜长岩、绿泥石绿帘石化斜长岩、绿帘石化斜长岩等变种^[1]。不同蚀变岩石之间为渐变过渡关系,表明它们是在同一个流体场中蚀变的产物。

如图 2-a 所示,斜长岩蚀变是在苏长岩侵入的条件下发生的,蚀变强度与距苏长岩脉的距离成反比。

2.2 苏长岩

苏长岩的出露面积远小于斜长岩,常常呈脉状出现在斜长岩的构造裂隙中。但是,钻探资料表明深部可能有大量的苏长岩,与黑山铁矿露天采场的观察结果一致,表明大庙斜长岩杂岩体具有上部为斜长岩、下部为苏长岩的似层状结构。这一认识对于进一步成矿预测具有重要的意义。

苏长岩主要有两种岩石变种,一种是斜长石“斑晶”含量不等的灰色苏长岩(图 3-c),另一种是粗糜棱岩化苏长岩(图 3-d)。

灰色苏长岩暗色矿物含量较多,浅色组分变化不定,当斜长石含量增加到 90vol.%及其以上时,苏长岩可以过渡为斜长岩。这可能就是为什么前人认为苏长岩与斜长岩为渐变过渡关系的原因^[2]。但是,一个被忽略的重要问题是矿物的结晶顺序和岩浆侵位深度之间的关系(图 4)。假定玄武质岩浆具有 Di:An=1:1 的成分,如果用 Di 代表辉石,An 代表斜长石,意味着岩浆冷却时斜长石首先结晶的条件是较低压力^[2]。如果斜长岩果真形成于 0.3~0.6 GPa^[4]或 0.33~0.66 GPa^[2],则必然是辉石为液相线矿物(图 4),不能理解斜长石发生堆晶作用的解释。因此,要么玄武质岩浆侵位到了使其达到斜长石首晶区的压力范围,要么斜长岩是暗色矿物分离结晶之后残余岩浆固结的产物,或者苏长岩中的斜长石巨晶是苏长岩岩浆侵位过程中从顶板斜长岩中捕获的斜长石捕虏晶。在缺乏详细的观察资料之前,我们尚不能肯定哪一种解释是正确的,但可以确认第二种解释是错误的,因为暗色矿物具有小得多的粒径(图 3-c),

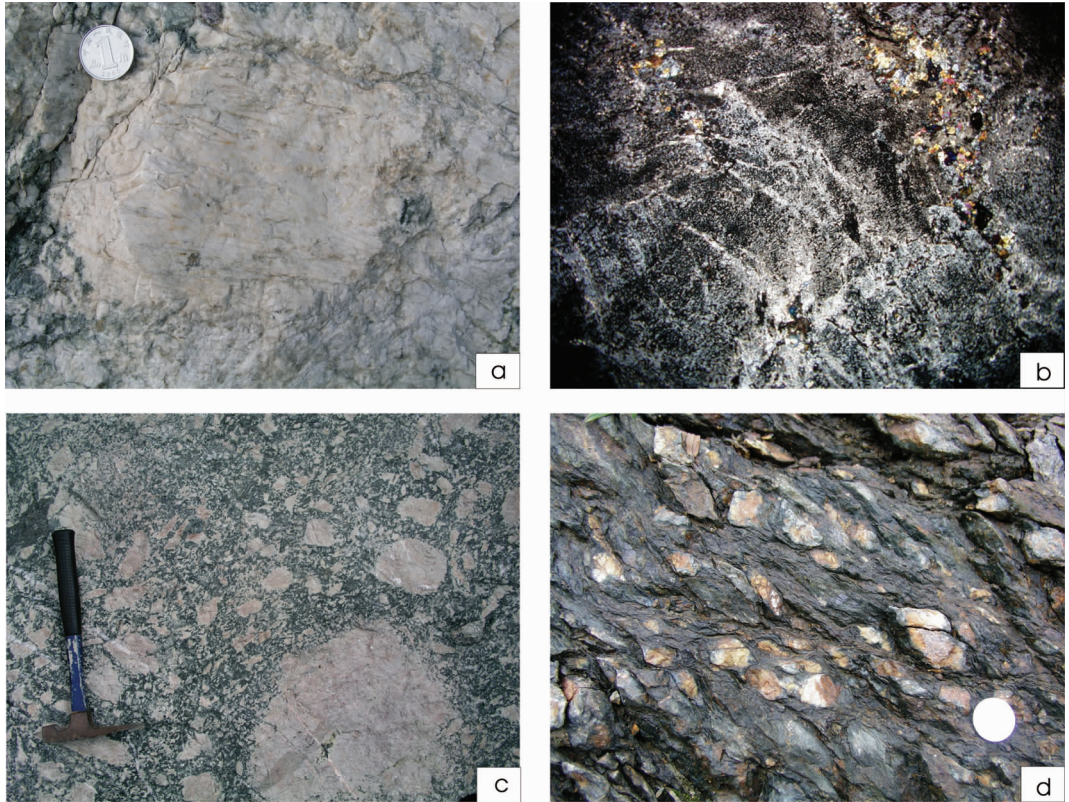


图 3 黑山铁矿露天采场的主要岩石类型

a—浅色斜长岩与斜长石碎斑,硬币直径为 1.9cm ;b—碎裂斜长岩,沿裂隙斜长石被蚀变成细粒白云母,正交偏光,视域宽度约 1.5cm;c—斑状苏长岩,地质锤长度为 35cm;d—苏长质粗糜棱岩,硬币直径为 1.9cm

Fig.3 Main rock types in the open-pit of the Heishan iron mine

a—Leuco-anorthosite with plagioclase porphyroclast phenocrysts (diameter of the coin being 1.9 cm); b—The cataclastic anorthosite with fine muscovites filled along the cracks of plagioclase, cross polarized, with the bottom length being 1.5 cm or so; c—Porphyritic norite (length of the hammer being 35cm); d—Noritic coarse mylonite (diameter of the coin being 1.9 cm)

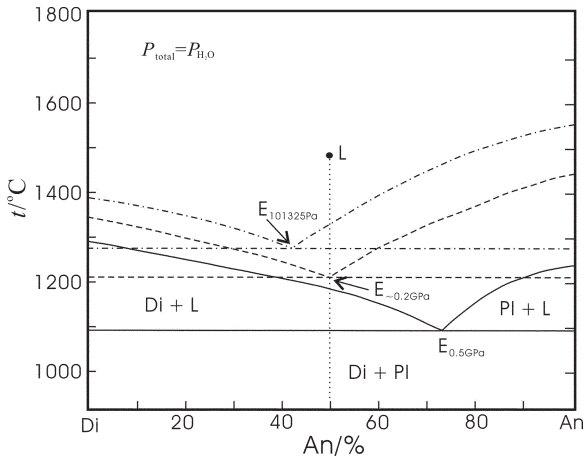


图 4 Di-An 相图(转引自文献[13])

Di —透辉石端元组分;An —钙长石端元组分;L —假设的熔浆;
E — 共结点,下标为压力,单位 GPa

Fig.4 Di - An diagram (from [13])

Di - end member of diopside; An - end member of anorthite; L - supposed melt; E - eutectic point. Subscript indicates the pressure in GPa

晶体生长时间远小于斜长石。

相反,糜棱岩化苏长岩则有可能更接近于玄武质原生岩浆的成分,因为其辉石:斜长石比例更接近于共结比。值得重视的是,糜棱岩化苏长岩中常常出现相对均匀分布的磁铁矿颗粒,即浸染状矿化(图 3-d)。这是硅酸盐矿物结晶时圈闭的铁钛氧化物结晶的产物,而不是晚期流体交代或渗透的结果。这种分析与叶东虎^[1]和李国兴等^[2]的认识是一致的,即苏长岩与成矿作用的关系更为密切。

由此可见,尽管从化学成分上看可以认为大庙苏长岩与斜长岩之间为演化关系,它们的地质关系并不支持这样的解释。至少,大庙斜长岩不是当前所见苏长岩的岩浆分异产物。

2.3 铁矿物

大庙式铁矿的造矿矿物主要为含钽的钛磁铁矿^[1],其矿石类型和矿石结构类型却复杂多样。根据叶东

虎^[1],大庙铁矿的矿石类型包括:磷灰石矿石(磷矿石)、钒钛磁铁矿-磷灰石矿石(铁磷矿石)、钒钛磁铁矿矿石(铁矿石)、钛铁矿-钛磁铁矿矿石(钛铁矿石)、磁黄铁矿-黄铁矿石(硫化物矿石)。野外观察表明,铁矿石至少包括以下几个结构变种:伟晶状矿石、堆晶结构矿石、浸染状矿石、斑杂状矿石。

伟晶状矿石(图 5-a)系由巨大的造矿矿物晶体构成,单个钛磁铁矿晶体粒径可达 20 cm,一般为 3 cm 左右。众所周知,晶体生长速度与过冷度成反比,因而大晶体形成于岩浆缓慢冷却的条件下。据此,伟晶状矿石应当形成于较大深度,这与斜长岩杂岩体的推测形成深度^[1,2]是一致的。但是,与伟晶状矿石同深度水平产出的也有其他结构类型的矿石,表明岩浆结晶深度并非是影响岩浆过冷度的唯一因素。实际上,挥发分的存在可以大大降低岩浆的固相线

温度^[12,13],从而延长岩浆的结晶路径,使晶体获得更充裕的结晶时间,也可以晶出大晶体。相反,如果富含挥发分的岩浆突然失去挥发分,则只能晶出颗粒细小的晶体。据此,也可以认为伟晶状矿石是在富含挥发分的条件下结晶的。如果这种解释是正确的,有关矿浆的观点就是不能接受的,或者需要改变矿浆的基本定义。

在黑山铁矿露天采场底部,观察到一种矿石具有明显的堆晶结构(图 5-b)。矿石主要由中细粒(1~3 mm)钛磁铁矿组成,其基质为白色的斜长石,为典型的正堆晶结构^[14]。显微镜下观察,金属矿物颗粒大小比较均匀,基质已全部蚀变,由白云母和粉尘状磁铁矿组成(图 5-c)。这种矿石结构的出现有可能支持矿浆成因观点,遗憾的是并不多见,不能说明大庙式铁矿的总体特征。

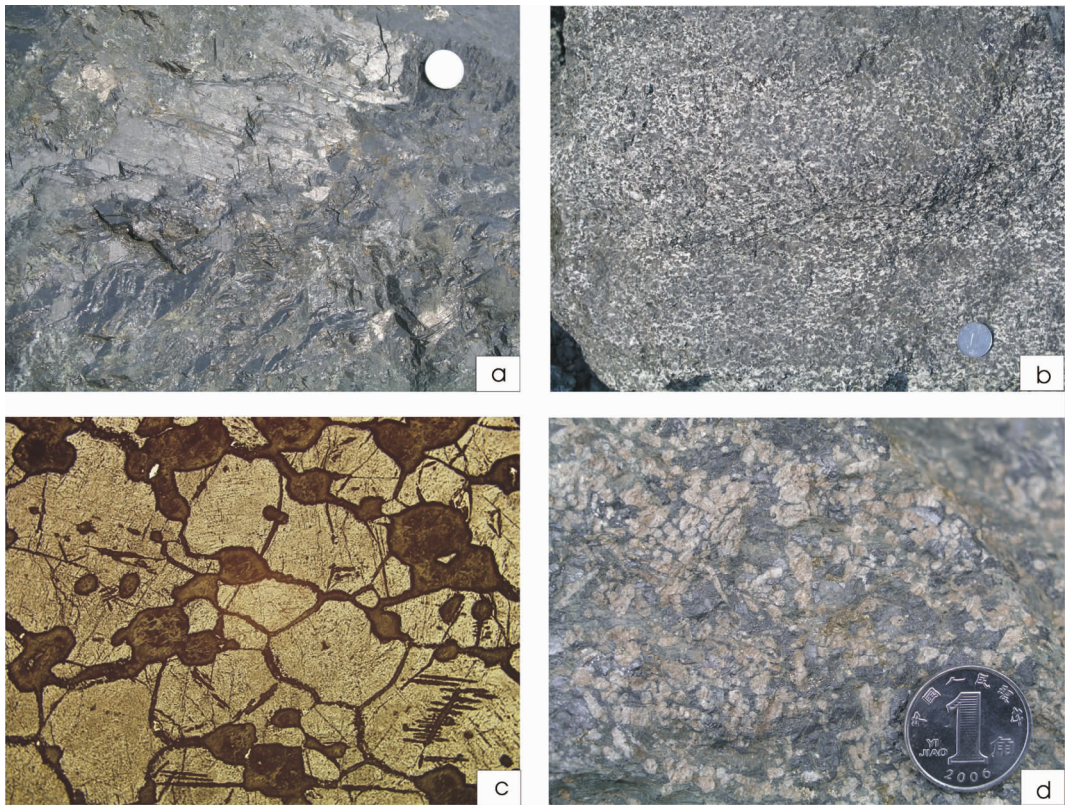


图 5 黑山铁矿代表性矿石的结构特征

a—伟晶状结构的钒钛磁铁矿矿石,硬币直径为 1.9cm;b—堆晶结构的钒钛磁铁矿矿石,硬币直径为 1.9cm;c—堆晶结构的钒钛磁铁矿矿石,反射光,单偏光,视域宽度约 1.5cm;d—斑杂状结构的钒钛磁铁矿矿石,硬币直径为 1.9cm

Fig.5 Main ore types in the open-pit of the Heishan iron mine

a—Vanadiferous titanomagnetite ore with pegmatitic texture (diameter of the coin bring 1.9 cm); b—Vanadiferous titanomagnetite ore with cumulate texture (diameter of the coin being 1.9 cm); c—Vanadiferous titanomagnetite ore with orthocumulate texture, reflected light, polarized light, with the bottom length being about 1.5 cm); d—Vanadiferous titanomagnetite ore with taxitic texture (diameter of the coin being 1.9 cm)

浸染状矿石普遍见于苏长岩中,当金属氧化物含量达到一定程度时,苏长岩就成了浸染状矿石。浸染状矿石中的金属氧化物晶体粒径略小于造岩矿物,较均匀地散布于辉石和斜长石之间。因此,金属氧化物可能总体与辉石和斜长石构成共结结构,或者是被造岩矿物圈闭的含矿流体结晶的产物。但是,无论是哪一种成因,都表明成矿物质是与镁铁质岩浆同时上升侵位的,甚至是从岩浆中析出的。从这个角度来说,将苏长岩看作是含矿母岩^[13]是有根据的。

斑杂状矿石是一种结构极不均匀的矿石,局部看来它们具有海绵陨铁结构的特征(图 5-d)。斜长石呈自形晶或碎片状,由不规则分布的磁铁矿集合体胶结。传统上,海绵陨铁结构(sideronitic texture)被认为是晚期岩浆矿床特征性的一种矿石结构^[15],这可能是值得商榷的。一个很重要的问题是这种理解将金属矿物看作是结晶的残余或矿浆贯入物。然而,一方面金属氧化物的密度远大于造岩矿物,残余的金属熔融体不可能均匀地分布在硅酸盐矿物之间;另一方面,不管硅酸盐与金属氧化物的共结比是多么小,残余富矿熔浆中最终还是要出现造岩矿物与造矿矿物的共结结晶作用,基质中不可能全部都是造矿矿物。此外,如果金属矿物是晚期矿浆贯入的产物,它们必然对斜长石发生推挤作用,矿石中将出现“塑性变形”现象。结合海绵陨铁结构的不均匀分布特征,这种结构只有在非常富含挥发分的情况下才能产生。

综上所述,尽管本文没有完全列出大庙式铁矿的所有矿石结构类型,所描述的矿石结构特征已足以暗示流体对成矿作用的重要性。尽管某些结构类型可以单独用分异过程来解释,综合起来考虑,却只有在大规模流体参与下才能形成所有这些矿石结构特征。

3 大庙铁矿的主要控矿构造特征

如前所述,笔者感到非常遗憾的是没有阅读到对大庙式铁矿进行详细矿田构造研究的资料。李国兴等认为斜长岩杂岩体受丰宁—隆化和红石砬—大庙两条深断裂的控制,控矿构造则主要为大庙—乌龙素沟和马营—乌龙素沟两条压扭性断裂带^[9]。一方面,笔者没有发现这些断裂与斜长岩杂岩体或矿体有某种必然的联系,另一方面,这些断裂在现今的遥感影像图上非常清晰,是新构造运动的标志。在遥远的

元古宙它们是否也同样活跃,尚缺乏足够的地质依据。因此,本文采用另一种途径,期望从容矿岩石的变形特征和矿体的分布来阐明主要的控矿构造。

3.1 斜长岩的变形特征

由于大庙斜长岩杂岩体形成于元古宙,长期的构造变动和叠加改造使得难于从区域变形的角度揭示大庙地区的控矿构造。因此,直接依据赋矿构造、特别是矿体的变形分析可能更为有效。

在赋存于斜长岩的脉状矿体中,可以观察到已经强烈蚀变的构造片岩块体被没有经受任何变形改造的矿石胶结(图 6-a)。构造片岩的原岩为斜长岩,表明成矿作用之前斜长岩已经遭受了强烈的构造变形,且变形作用以挤压或挤压剪切为特征,碎斑结构(图 3-a)可能就是在本次构造变形过程中形成的。此后,受到某种拉张应力的影响,成矿物质沿着先期形成的构造裂隙充填形成矿脉或含矿岩脉(图 2-c, d)。因此,成矿物质不仅可以沿着构造片理轻易剥离构造片岩(图 6-a),而且可以沿着岩石圈伸展时期形成的不规则裂隙倒灌进入斜长岩中(图 6-b)。这一时期,斜长岩已经具备了极高的渗透率,流体可以轻易渗透通过斜长岩,甚至斜长石解理中也充满了含矿流体,因而导致斜长岩的广泛蚀变(图 2-a, d)。相对贫挥发分的苏长岩岩浆也可以引起斜长岩的烘烤变质作用,但远没有矿脉引起的接触变质作用强烈。成矿作用发生以后,斜长岩至少还经历过一期挤压构造变形,因为斜长岩及其中赋存的矿脉都受到了挤压变形作用的影响(图 3-d, 6-d)。

由此可见,与成矿作用有关的斜长岩变形事件至少有 3 次:挤压→伸展→挤压。尽管笔者不清楚发生这 3 次变形的确切时间,其变形次序却是可靠的。

3.2 苏长岩的变形特征

与斜长岩相比,苏长岩的变形历史似乎简单得多,其中最明显的是糜棱岩化(图 3-d)。糜棱岩化过程中,斜长石晶体形成 σ 碎斑,可用于指示剪切应力的作用方向。暗色矿物则大多遭受到绿泥石化等蚀变作用,力学性质弱化,成为可塑性基质。

如前所述,苏长岩中浸染状矿化是其作为成矿母岩的有力证据。脉状矿体周边往往出现细粒片理化苏长岩,这种苏长岩与矿石之间为渐变过渡关系,也是成矿期侵入于斜长岩中幔源岩浆固结的产物。因此,苏长岩至少比斜长岩少经受了两次构造变形,没有记录表明苏长岩在成矿前已经遭受过变形改造。

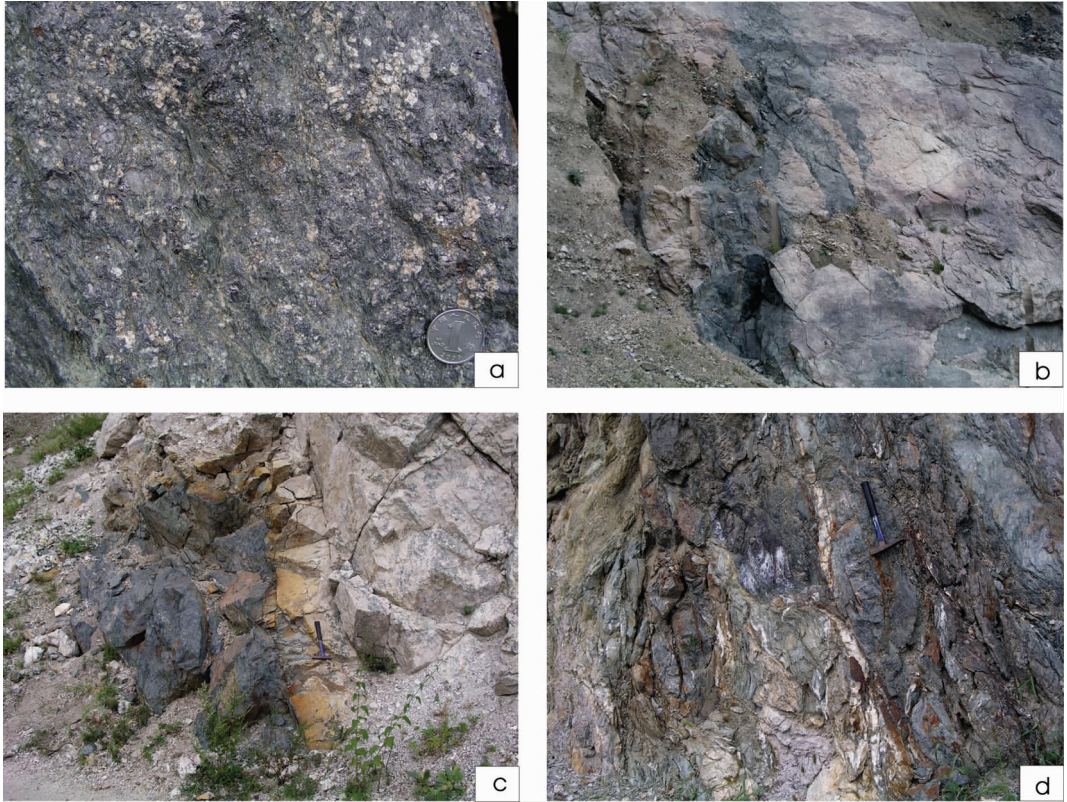


图 6 大庙斜长岩杂岩体的主要变形特征

a—具有斑杂状结构的矿石,内含原岩为斜长岩的蚀变构造片岩块体,硬币直径为 1.9cm;b—苏长质岩浆倒灌进入斜长岩中的张性裂隙,地质锤长度为 35cm;c—苏长岩侵入于斜长岩中,并导致斜长岩发生强烈蚀变和烘烤边;d—脉状矿体的变形特征,矿石与寄主苏长岩同时发生强烈剪切变形

Fig.6 Characteristics of deformed rocks and ores in the Damiao anorthosite complex

a—Taxitic ore with altered deformation fragments of metamorphic anorthosite (diameter of the coin being 1.9 cm);b—Noritic magma that flowed backward into tension fractures within anorthosite (length of the hammer being 35cm);c—Mineralized norite intruding anorthosite and causing alteration of the latter and the development of the roasted edge;d—Deformation characteristics of veinlet ore bodies, with ore and host norite contemporaneously deformed under a strongly shearing condition

3.3 脉状矿体的分布特征

脉状矿体大多为大庙式铁矿早期勘探查明的矿体,其展布方向可以用“杂乱无章”来形容(图 1),尽管前人强调北东向和北西向压扭性断裂带是苏长岩和含钒钛磁铁矿的沉淀场所^[9]。实际上,矿脉和苏长岩的展布方向变化很大,除了北东向和北西向两组之外,近南北向、北北东向、北北西向、北西西向、近东西向等沿其他方向展布的矿脉和苏长岩脉也随处可见(图 1)。结合前述的矿体变形特征分析,矿脉的这种展布特征实际上表明成矿期构造应力场主应力方向近于垂直,而不是水平挤压或拉张。

需要注意的是,一方面矿脉几乎总是与苏长岩伴生,另一方面矿脉密集区总体呈椭圆形,如马营、

黑山、大乌素沟等。这种展布特征表明,尽管单个矿脉受到斜长岩中已有构造裂隙的控制,矿脉群却是统一受含矿苏长岩岩浆的侵位构造控制。因此,矿体的赋存空间不仅有先期形成的构造裂隙,而且也可能有岩浆侵位过程中产生的自生长(self-propagation)裂隙。这大概就是为什么矿体展布方向变化多样的原因。

矿脉的垂直变化也是值得注意的。根据李国兴等^[9]和叶东虎^[10]的资料,大庙式铁矿脉状矿体具有上磷下铁的特征,即高处以磷矿石和铁磷矿石为主,低处以铁矿石占优势。与铁相比,磷具有更亲流体的地球化学属性,这种分布特征再次证实了流体对于大庙式铁矿成矿过程的重要性。

此外,由图2-c可见,黑山露天采场所见矿脉向下增多,形态变复杂(图2-b)。这种变化可能是斜长岩岩块沉入(sinking)苏长岩岩浆中的结果,或者是苏长岩岩浆顶蚀(stopping)的产物。如果这种推论是正确的,由于正常苏长岩岩浆的密度大于斜长岩,斜长岩岩块大量沉入苏长岩中就是苏长岩岩浆含有大量含矿流体(可以有效降低熔浆的密度)的有力证据。

3.4 似层状矿体

值得注意的是,河北省地勘局第四地质大队近年来在大庙地区(如黑山铁矿)的深部勘探工作取得了重要进展^①,所有深孔都发现有厚大的富铁矿体。这种情况与黑山铁矿露天采场坑底所见情况一致,表明大庙地区的厚大铁矿体隐伏于斜长岩层之下。矿体总体倾向南东,倾角60°左右。单个矿体长度一般为200~300 m,最大达400~600 m,小矿体的长度为50~100 m,厚度从几米至百余米^[3],沿倾向有一定变化。值得注意的是,大庙式铁矿的矿体平面延长小于延深,延深一般是延长的2~4倍^[3]。由于许多矿体的深部尚缺乏工程控制,延深与延长的实际比值可能更大。矿体的这种展布特征与上述构造应力场分析是一致的,即主应力为垂直方向。

似层状矿体的储量远大于脉状矿体的储量,仅黑山地区,补充勘探获得铁矿资源储量就达3919.74万t,大于以前探明的总储量(3540.01万t)。可见,大庙式铁矿的主要矿体是深部的似层状矿体,而不是浅部斜长岩中的脉状矿体。

4 大庙铁矿的成因与勘探前景

新的勘探资料和笔者的野外地质观察都表明,大庙式铁矿的成因模型存在严重的不足。首先,如果将矿浆理解为“成矿物质高度集中的熔浆”^[3]的话,其密度必然大于一般的硅酸盐岩石和岩浆,侵位过程必然受到浮力原理的制约,即不可能借助浮力侵位于比其密度小的硅酸盐岩石中。其次,在挤压环境中,高密度的矿浆的确可以因构造挤压而侵入上覆岩层的构造裂隙中,但前述构造变形分析不支持成矿期为挤压环境的认识。因此,正确认识大庙式铁矿的形成过程是对区域找矿潜力重新评价的基础。

4.1 大庙式铁矿的成因模型

罗照华等^[19]发展了的透岩浆流体成矿理论有可

能为大庙式铁矿的成因作出更为合理的解释。根据透岩浆流体成矿理论,岩浆体系和流体体系被看作是两个完全独立的地质体系,它们因相互需要而耦合在一起,并由于侵位后的解耦而发生成矿作用^[16,17]。

众所周知,岩浆是一种粘稠的硅酸盐熔体,受粘滞力的影响,其侵位过程必然是缓慢的。另一方面,流体中成矿物质的溶解度随压力降低而急剧减小^[18],加之岩石圈不同圈层组成岩石的物理化学性质有别,深部含矿流体通过渗滤方式上升必然导致流体中成矿物质含量的大大降低。因此,含矿流体只有快速上升侵位才有可能导致地壳浅部的成矿作用^[19]。从这个角度来说,成矿体系是一个远离平衡的体系^[21,21]。如果含矿流体与岩浆混合在一起,岩浆可以对流体起到保护作用,而流体则可以稀释岩浆,降低岩浆的密度和粘度,从而使岩浆获得更大的浮力和上升速率。因此,岩浆是含矿流体的“开路先锋”,流体则是岩浆快速上升的“推进器”^[19]。从这个角度来说,岩浆-含矿流体混合物是一种挥发分过饱和的混合体系,类似于泥石流体系^[23]。

一旦岩浆-流体混合物侵位,流体的出溶机制和含矿流体的运移以及流体运移路径上物理化学边界层的位置将对成矿作用起到决定性的控制作用^[23]。理论上,含矿流体可以分成三部分:机械混入流体(绝对过饱和流体),因压力降低而导致的过饱和流体(相对过饱和流体),硅酸盐结晶而导致的过饱和流体(残余流体)。一旦岩浆-流体混合物侵位,流体将从中逃逸。由于流体中挥发分的存在形式至少有两种:分子和离子基团^[24-26],流体逃逸的速度将依赖于化学反应速度,如 $\text{H}_2\text{O} + \text{O}^{2-} = 2\text{OH}^-$ 。这类反应依赖于压力和温度,压力增高有利于反应向右进行,温度增高则有利于反应向左进行。因此,在平衡的条件下,理论上以分子形式存在的挥发分将首先逃逸出岩浆-流体混合物,而以离子基团形式存在的挥发分则需要通过平衡反应转换成分子形式以后才能逸出。火山学家清楚地理解岩浆中挥发分逃逸的机制,将这一过程称为岩浆的发泡作用(bubbling),而气体的排出则称为排气作用(degassing)。当挥发分强烈过饱和时,岩浆排气作用可能特别强烈,因而上述反应可能进行不完全。根据前人的实验资料,流体中的成矿物质主要以离子基团化合物的形式存在^[24,25],

①河北省地质矿产勘查开发局第四地质大队,河北省承德县黑山铁矿矿区1、2号矿体0-28线(650 m以下)补充勘探地质报告,2005。

因而强烈的排气作用必然将成矿物质大量携出。反之,成矿物质将仍然保留在岩浆体中。

根据这种分析,可以将大庙式铁矿的形成过程概述如下。大庙斜长岩形成很长时间(已经完全固结)以后,发生了苏长质岩浆-含矿流体混合物的侵位。不管这种混合物侵位时区域构造应力场如何,岩浆侵位造成的向上推挤作用和出溶气体的体积膨胀都可以造成上覆斜长岩沿着先期形成的构造裂隙发生张裂作用,从而为成矿物质的充填开辟空间。如果岩浆-流体混合物的上侵能力特别强烈,还可以自己开辟构造通道。因此,大庙地区矿脉充填的构造裂隙并非都是先期存在的构造裂隙,也有一部分为自生长裂隙。然而,岩浆-流体混合物的侵位深度很大,流体的出溶速度受到较大的限制,能够逃逸的成矿物质毕竟是少数,因而大庙铁矿田的主要矿石储量不应当在脉状矿体中。这种分析不仅与大庙铁矿的三维空间分布一致,而且也与其结构构造特征吻合。根据这个模型,可以很好理解为什么有的矿石具有伟晶状结构(流体局部富集),另一些矿石则为细粒结构(流体的丢失造成固相线温度升高)。需要注意的是,如果岩浆-流体混合物体积巨大,其内部不同组成部分的排气过程是不同的。当混合体的表层实现排气之后,其固相线温度和密度将逐渐增加,并因而导致其内部的含矿流体越来越难于逃逸。在这种情况下,一部分成矿物质被封存在硅酸盐矿物粒

间形成浸染状矿化,另一部分成矿物质则有可能形成较高密度的含矿流体流侵入于岩浆体的已固结部分,形成苏长岩中的脉状矿体。

有趣的是,黑山铁矿露天采场东壁上的一个露头准确刻画了大庙式铁矿的成因模型(图7)。图7-a左下角苏长岩部分可以理解为侵入于斜长岩底板之下的苏长岩岩浆,由于强烈的发泡和排气作用,其上部的密度小于斜长岩,同时流体流对斜长岩发生强烈的顶蚀作用,造成顶板斜长岩(下部中央的褐色部分)的破裂与下沉。这种特征与图2-b展示的苏长岩与斜长岩接触关系极为类似。下沉斜长岩块两侧分布着沿裂隙上升的含矿稀岩浆,它们具有极不规则的分支复合形态,并大致在苏长岩的顶部和图7-a的二分之一处聚集形成一个成矿物质富集带。此后,少量的含矿稀岩浆或流体流继续沿斜长岩中的裂隙上升,并在图7的右上角产生向下的倒灌现象。在更大的时空尺度上,含矿稀岩浆或流体流将可以发生一定的分异作用,产生上磷下铁的矿石类型分布特征。可见,由图7所解读的成矿特征与上述大庙式铁矿的特征极为类似,表明所展示的过程可能在宏观尺度上也曾经发生过(图7-b)。图7-b还划出了一条拆离断层,表示苏长岩岩浆曾经侵位于地壳拆离构造中。成岩成矿以后,该断层仍有活动。

4.2 大庙铁矿田的的勘探前景

上述成矿过程与浮选选矿工艺非常类似。在浮选

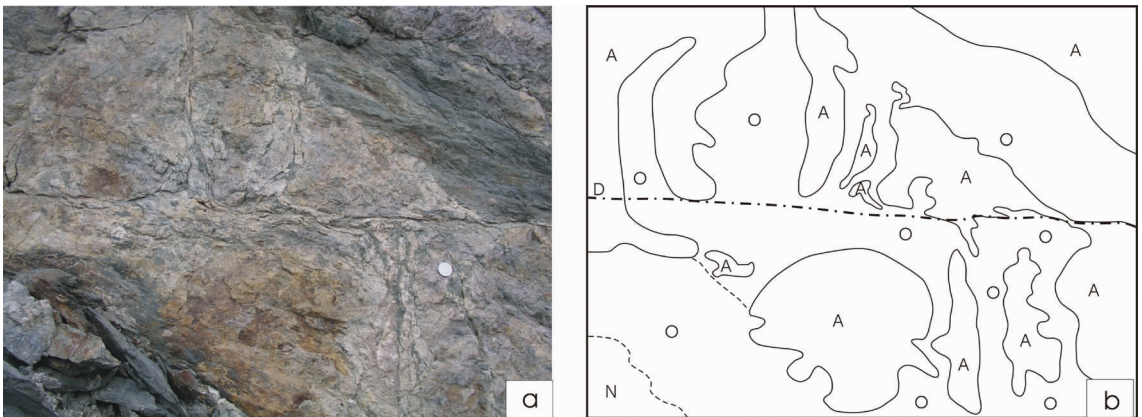


图7 大庙式铁矿成因的自然写照(说明见正文)

a—野外露头照片,硬币直径为1.9cm;b—基于照片的素描图,其中:A—斜长岩,
N—苏长岩,O—矿体,D—拆离断层

Fig.7 Natural portrayal of the genesis of the Damiao-type iron deposit (see text for details)

a—Picture of the outcrop (diameter of the coin being 1.9 cm); b—Sketch based on the picture
(A—anorthosite; N—norite; O—ore body; D—detachment fault)

工艺中,矿浆(矿粉与浮选液的混合物)的发泡作用是一个关键环节^[7]。有用物质的亲气性和亲湿性不同,决定了矿石矿物微粒是被气泡携带到浮选槽的上部还是沉淀到底部,分别称为正浮选和反浮选^[7]。为了获取气泡,早期的浮选工艺曾经使用加压的方法使矿浆中溶解更多的气体,然后在减压过程中使溶解的气体析出。可见,这种浮选工艺与自然过程非常相似。所不同的是,自然过程具有很宽广的温度、压力变化范围,且在流体发泡之前造矿矿物尚未结晶。因此,如果含矿流体与岩浆实现快速分离,成矿物质将随流体运动而远离岩浆体,并在适当的地方堆积,类似于正浮选;反之,离子基团将与成矿金属实现完全分离,并形成气体逸出熔浆,而成矿金属将残留在岩浆体内。根据前人的温压估算结果,大庙苏长岩大致侵位于10~20 km深处^[1,2]。在这样的深度水平上,岩浆-流体混合物的排气作用应当是缓慢的。磷矿石、铁磷矿石和铁矿石分布的水平高度差距不大,可以作为缓慢排气作用的有利证据。因而大部分铁矿资源应当仍然位于深处的苏长岩中,正如新的勘探资料所表明的那样。据此,可以推测大庙斜长岩之下蕴藏有丰富的铁矿资源。

需要注意的是,现今的钻探工程主要布置在脉状矿体密集区。按照笔者的模型,这些地区应当是苏长岩顶面向上凸出的地区,其他地区尚未证明斜长岩之下是没有矿体产出的。由于随着岩浆的冷却含矿流体流越来越难于透过苏长岩,可以推测,苏长岩中应当普遍含有铁矿层。如果是这样,大庙斜长岩之下的铁矿资源将非常丰富,有可能超过100亿t(88000000 m^2 (矿层面积) $\times 100 \text{ m}$ (矿层厚度) $\times 1.5 \text{ t/m}^3$ (TFe平均含量)=132亿t)。可见,即使将估算储量减半,大庙地区也将成为中国的巨型铁矿基地。

5 讨论与结论

初步研究表明,大庙地区不仅没有面临资源枯竭的危险,而且有可能成为中国最大的铁矿基地之一。当然,笔者的工作还仅仅是初步的。大部分学者可能会对这项研究成果表示怀疑,因为笔者的思路明显不同于现今流行的矿床学研究方法。当前,绝大多数学者十分关注成矿作用的化学过程。然而,化学数据的多解性使得这些研究成果在指导生产实践方面遭遇到挑战。与此相反,物理过程的研究则是被人们所忽视的领域。由于物理过程可以产生肉眼

可见的地质产物,必须建立在详细的地质观察和物理模型的基础之上,研究成果可能更容易为生产单位所接受。因此,笔者试图将复杂的物理化学过程转换为露头级别上可以详细观察的地质现象,笔者的工作是一个初步尝试,主要以野外地质观察为基础,结合物理化学的基本原理,企望将零散的地质证据统一在一个整合的矿床成因模型中。这个模型可以更好地解释大庙铁矿田所观察到的各种地质现象,因而笔者相信这个模型基本上反映了大庙式铁矿的形成过程,对进一步找矿勘探工作具有较好的指导意义。因此,可以得出以下几点结论:

(1)所有内生金属矿床都伴随着强烈的围岩蚀变,没有蚀变的岩石都没有成矿潜力,围岩蚀变以含水(挥发分)矿物取代无水(挥发分)矿物为特征,这样的证据链表明成矿作用的基本解是造矿矿物从含矿流体中沉淀出来,因而成矿流体行为的研究是矿床学研究的关键之一。

(2)成矿流体也可以通过流体活动的物理效应(岩浆的活动性、排气作用、密度变化、构造效应、岩石-矿石结构构造等)来研究,通过地质产物的总体性状分析当时流体活动的性状,在某种程度上可能更为贴合实际地质情况。

(3)大庙地区的铁矿资源具有广阔的找矿前景,有可能成为中国最大的铁矿基地之一。

致谢:文章撰写过程中,王学明先生提出了有益的建议,在此表示衷心谢意。同时,基于透岩浆流体成矿作用理论的研究还刚刚起步,也恳望同行提出更多的批评指正。

参考文献(References):

- [1] 叶东虎. 河北省承德大庙斜长岩区斜长岩体地质及钒钛磁铁矿床、钒钛磁铁-磷灰石矿床研究报告[R]. 河北省地矿局第四地质大队, 1986:1-836.
Ye Donghu. The Report on Geology of the Anorthosite Massifs and Their V-Ti-Fe Deposits and V-Ti-Fe-P Deposits at Damiao region, Chengde, Hebei Province [R]. The No. 4 Team of the Bureau of Geology and Exploration of Hebei Province, 1986:1-836(in Chinese).
- [2] 解广轰. 大庙斜长岩和密云环斑花岗岩的岩石学和地球化学——兼论全球岩体型斜长岩和环斑花岗岩类的时空分布及其意义[M]. 北京:科学出版社, 2005:1-195.
Xie Guanghong. Petrology and Geochemistry of the Damiao Anorthosite and Miyun Rapakivii—— Concurrently on the Temporal-Spatial Distribution of the Global Massif Anorthosites and Rapakivii Granitoid and Their Implications [M]. Beijing: Science

- Press, 2005:1-195 (in Chinese).
- [3] 李国兴, 苏桂林, 孙静, 等. 河北承德大庙式钒钛磁铁矿床成矿规律及成矿系统发育深度的初步研究 [J]. 中国地质, 2007, 34 (增刊): 118-125.
- Li Guoxing, Su Guilin, Sun jing, et al. Preliminary study on the metallogenesis and depths of the metallogenic system of the Damiao V-Ti-Fe deposits, Chengde, Hebei Province [J]. Geology in China, 2007, 34(supp.):118-125(in Chinese).
- [4] Longhi J. A mantle or mafic crustal source for Proterozoic anorthosites[J]. Lithos, 2005, 83:183-198.
- [5] 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 等. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(3):685-690.
- Zhao Taiping, Chen Fukun, Zhai Mingguo, et al. Single zircon U-Pb ages and their geological significance of the Damiao anorthosite complex, Hebei Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3):685-690 (in Chinese with English abstract).
- [6] Zhang Shuanghong, Liu Shuwen, Zhao Yue, et al. The 1.75-1.68 Ga anorthosite - mangerite - alkali granitoid - rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a Paleoproterozoic orogen[J]. Precambrian Research, 2007, 155:287-312.
- [7] Bogdanova S V, Pashkevich I K, Buryanov V B, et al. The 1.80-1.74 Ga gabbro - anorthosite - rapakivi Korosten Pluton in the Ukrainian Shield: a 3-D geophysical reconstruction of deep structure[J]. Tectonophysics, 2004, 381:5-27.
- [8] Berg J H. Dry granulite mineral assemblages in the contact aureoles of the Nain Complex Labrador [J]. Contribution of Mineralogy and Petrology, 1977, 6:32-52.
- [9] Jansen J B H, Blok R J P, Bos A, et al. Geothermometry and geobarometry in Rogaland and preliminary results from the Bamble area [C]//Touret J L R (ed.). The Deep Proterozoic Crust in the North Atlantic Provinces. Dordrecht, Netherlands, 1985:499-516.
- [10] Rothstein D A, Manning C E. Geothermal gradients in continental magmatic arcs: Constraints from the eastern Peninsular Ranges batholith, Baja California, México [J]. Geological Society of America, 2003, Special Paper 374:337-354.
- [11] Sandiford M, Hand M and McLaren S. High geothermal gradient metamorphism during thermal subsidence [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 163:149-165.
- [12] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 岩石成因、构造环境与成矿作用 [M]. 北京:地质出版社, 2004:1-381.
- Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, et al. Petrogenesis, Tectonic Environment and Metallogeny [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2004:1-381(in Chinese).
- [13] 邓晋福. 岩石相平衡与岩石成因[M]. 武汉:武汉地质学院出版社, 1987:1-198.
- Deng Jinfu. Phase Equilibrium in Rocks and Petrogenesis [M]. Wuhan: Wuhan College of Geosciences Press, 1987:1-198 (in Chinese).
- [14] 路凤香, 桑隆康. 岩石学[M]. 北京:地质出版社, 2002:1-399.
- Lu Fengxiang, Sang Longkang. Petrology [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2002:1-399 (in Chinese).
- [15] 程裕淇, 王鸿祯主编. 地球科学大辞典(应用科学卷)[M]. 北京:地质出版社, 2005:1-1201.
- Cheng Yuqi, Wang Hongzhen. A Dictionary of Earth Sciences [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005:1-1201(in Chinese).
- [16] 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 等. 透岩浆流体成矿作用——理论与分析与野外证据[J]. 地学前缘, 2007, 14(3):165-183.
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, et al. Metallogeny by trans-magmatic fluids——Theoretical analysis and field evidence[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (3):165-183 (in Chinese with English abstract).
- [17] 罗照华, 卢欣祥, 王秉璋, 等. 造山后脉岩组合与内生成矿作用[J]. 地学前缘, 2008a, 15(4):1-12.
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Wang Bingzhang, et al. Postorogenic dike complexes and implications for metallogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2008a, 15(4):1-12 (in Chinese with English abstract).
- [18] Loucks R R, Mavrogenes J A. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions [J]. Science, 1999, 284:2159-2163.
- [19] 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 碰撞造山带斑岩型矿床的深部约束机制[J]. 岩石学报, 2008b, 24(3):447-456.
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Chen Bihe, et al. The constraints from deep processes on the porphyry metallogenesis in collisional orogens [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008b, 24 (3): 447-456 (in Chinese with English abstract).
- [20] 於崇文. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘(上)[J]. 地学前缘, 1999, 6 (1): 85-102.
- Yu Chongwen. Large ore deposits and metallogenic districts at the edge of chaos(1)[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1):85-102 (in Chinese with English abstract).
- [21] 於崇文. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘(下)[J]. 地学前缘, 1999, 6(2):195-230.
- Yu Chongwen. Large ore deposits and metallogenic districts at the edge of chaos(2)[J]. Earth Science Frontiers, 1999. 6 (2):195-230 (in Chinese with English abstract).
- [22] 兰恒星, 周成虎, 王小波. 泥石流本构模型及动力学模拟研究现状综述[J]. 工程地质学报, 2007, 15(3): 314-321.
- Lan Hengxing, Zhou Chenghu, Wang Xiaobo. A literature review on debris flow constitutive model and its dynamic simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(3):314-321(in Chinese with English abstract).
- [23] 於崇文. 矿床在混沌边缘分形生长(上)[M]. 合肥:安徽教育出版社, 2006:1-705.
- Yu Chongwen. Fractal Growth of Mineral Deposits at the Edge of Chaos (1) [M]. Hefei: Anhui Education Press, 2006:1-705 (in Chinese).
- [24] 朱永峰, 曾贻善, 艾永富. 长英质岩浆中液态不混溶与成矿作用关系的实验研究[J]. 岩石学报, 1995, 11(1):1-8.
- Zhu Yongfeng, Zeng Yishan, Ai Yongfu. The experimental study about the liquid immiscibility and ore-forming process in felsic

- magma[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11 (1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [25] Zhu YF, Zeng YS, Ai YF. Experimental evidence for a relationship between liquid immiscibility and ore-formation in felsic magmas[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, (11):481–487.
- [26] Veksler IV. Liquid immiscibility and its role at the magmatic – hydrothermal transition:a summary of experimental studies [J]. *Chemical Geology*, 2004, 210:7 – 31.
- [27] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2001:388–538.
- Xie Guangyuan. *Mineral Processing Technology* [M]. Xuzhou: China University of Mining & Tecnology Press, 2001:388–538(in Chinese).

Is the Damiao ore field a crisis mine or a potential giant iron base?

SUN Jing¹, LUO Zhao-hua², ZHANG Chang-hou², GUO Shao-feng^{2,3}, LI Jian¹, DU Wei-he¹,
WANG De-zhong¹, PAN Ying², ZHOU Jiu-long², LI Xu-dong²

(1. No. 4 Geological Party, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration, Chengde 067000, Hebei, China;

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. No. 2 Geological Party, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: Detailed field observations have revealed that the Damiao iron ore field obviously has excellent potential and is likely to become the largest base area of iron resources in China. New evidence supports neither the opinion that all the component igneous units in the Damiao anorthosite complex were evolutionary products of a unique primary magma nor the hypothesis that ore magma was responsible for the formation of the Damiao-type iron deposit. The anorthosite underwent at least two more times of deformation than the norite, suggesting that the norite was emplaced after the consolidation and cooling of the anorthosite. The generation of the Damiao-type iron deposit is closely related to the noritic magma. Nevertheless, the ore-forming materials were derived from the concurrently emplaced transmagmatic fluids instead of from the noritic magma differentiation. The degassing process of the ore magma-fluid mixed materials in the deep crust led to the concentration of the ore-forming materials in the norite and the differentiation characteristics of the mineral veins, i.e., the apatite was concentrated in the shallow place, while the titanomagnetite became rich in the deeper part. The main ore bodies are buried in the norite substrate beneath the anorthosite cover. Therefore, the Damiao iron ore field is a very promising area instead of a crisis mine.

Key words: Damiao; iron deposit; transmagmatic fluid; mineralization; structural deformation; anorthosite; norite

About the first author: Sun Jing, male, born in 1970, senior engineer, engages in exploration of mineral sources; E-mail: dagssj@126.com.

Correspondence author: Luo Zhao-hua, male, born in 1956, professor, engages in research on magmatism and metallogenesis; E-mail: luozh@cugb.edu.cn.